Einrichtung zur Kompensation thermisch bedingter Formänderungen mittels auxetischer Strukturen

Faunhofer-Gesellschaft, Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Dresden

Autoren: Schmidt, Gerhard; Semmler, Ulrich; Hommola, Alexander

Datum: 2014-03-03

Keywords deutsch: Materialbearbeitung, spanendes Werkzeug, Werkzeugmaschine, Kompensation, thermische Formänderung, thermische Längenausdehnung, Umformwärme, auxetische Struktur

Keywords english: material processing, cutting tool, machining, machine tool, compensation, thermal form change, thermal expansion, deformation heat, auxetic structure

Bei der spanenden Bearbeitung von Bauteilen ist die Entstehung von Prozesswärme im Bereich der Spanbildungszone auf Grund der Umformwärme im bearbeiteten Werkstoff und der Reibung zwischen Werkzeug, Span und Werkstückoberfläche unvermeidlich. Diese kann nur zum Teil durch Kühlung abgeführt werden, da das Kühlmittel nicht in ausreichender Menge in die unmittelbare Umgebung der Spanbildungszone gelangt. Die verbleibende Restwärme führt unvermeidlich zu thermo-elastischen Verformungen an Werkzeug und Werkstück. Ein Teil der Wärme gelangt auch in Werkstückspannvorrichtungen sowie weitere Komponenten der Maschine und bewirkt auch dort Verformungen. Diese Verformungen führen letztlich zu einer Relativverlagerung zwischen Bauteiloberfläche und Werkzeugschneide und damit zu Beeinträchtigungen der Maß- und Formgenauigkeit des bearbeiteten Bauteiles. Die Umformwärme kann nur in engen Grenzen durch Prozessparameter und Werkzeugausführung beeinflusst werden. Besonders hohe Temperaturen entstehen bei der Hochleistungsbearbeitung (HPC), der Trockenbearbeitung und bei der Bearbeitung schwer spanbarer Werkstoffe.

Durch verschiedene Arten der Kühlung und Schmierung wird versucht, die Reibung zu verringern und einen Teil der entstehenden Prozesswärme von Werkzeug und Werkstück abzuführen. Konventionelle Kühlschmiermittel wie Öle und Emulsionen sind ökologisch und gesundheitlich nicht unbedenklich und verursachen hohe Kosten bei Wartung und Entsorgung. Deshalb besteht ein ausgeprägter Trend zur Minimalmengenschmierung oder zur vollständigen Trockenbearbeitung. Dem stehen jedoch die steigenden Anforderungen an die Bauteilgenauigkeit entgegen.
Der Einsatz kryogener Kühlung mittels flüssigem Stickstoff oder Kohlendioxid führt zwar zu weniger Verschmutzungen von Werkstück, Maschine und Umwelt ist aber ebenfalls mit hohem technischen Aufwand verbunden. Thermische Verformungen treten nach wie vor, teilweise aber mit umgekehrtem Vorzeichen auf.
Die Menge der entstehenden Umformwärme kann durch angepasste Bearbeitungsparameter und Werkzeuggeometrie, vor allem durch Schnittgeschwindigkeit, Spanungsquerschnitt und Schneidkantenfeingestalt, beeinflusst werden. Die erreichbaren Effekte sind aber relativ gering und beeinträchtigen die Effizienz der spanenden Bearbeitung.
Der Einsatz von Materialien mit sehr geringer Wärmedehnung, wie Invar oder Keramik, ist für komplette Werkzeuge wegen der zu geringen Festigkeit, Härte und Zähigkeit nicht praktikabel.
Eine Klimatisierung von Maschine und Umgebung ist aufwändig und kann vor allem die thermische Beeinflussung von Maschinenbauteilen reduzieren. Die nahe an der Wirkstelle befindlichen Werkzeuge und Vorrichtungsteile werden dagegen kaum beeinflusst, da die Prozesswärme unverändert bleibt.

Während die Korrektur und Kompensation kraft- und verschleißbedingter Maschinenverformungen bereits allgemeiner Stand der Technik sind, werden thermisch bedingte Verformungen, insbesondere an Werkzeug und Vorrichtung bisher nicht ausreichend berücksichtigt, da sie im Verhältnis zu den thermischen Verformungen anderer Maschinenkomponenten klein sind. Bei Genauigkeitsanforderungen im Bereich weniger Mikrometer ist ihr Einfluss auf die erreichbare Form- und Maßgenauigkeit aber nicht mehr zu vernachlässigen.

Ziel des neuen Ansatzes ist die Kompensation der thermischen Verformung an Werkzeug und Vorrichtung unter Ausnutzung der im Prozess freiwerdenden Wärme selbst und ohne Zuführung zusätzlicher Fremdenergie. Dazu werden Komponenten mit negativem Wärmeausdehnungskoeffizienten eingesetzt. Durch Zuführung zusätzlicher Energie kann die Wirkung verstärkt werden.
Auxetische Materialien sind durch eine negative Poisson-Zahl gekennzeichnet. Das heißt, dass sie sich bei einer Druckbeanspruchung in Längsrichtung in Querrichtung zusammenziehen (s. Abb. 1). Diese Eigenschaft ist entweder durch eine bestimmte Molekülanordnung, zum Beispiel bei Polymeren (Burke, 1997), (Pour, et al., 2006), oder durch eine entsprechende geometrische Struktur (Mitschke, et al., 2011), (Schwerdtfeger, et al., 2011), (Obrecht, et al., 2011) bedingt. Im zweiten Fall kann dieses Verhalten für beliebige feste Materialien künstlich erreicht werden. Eine Zusammenfassung bekannter auxetischer Materialien und Strukturen ist in (Liu, 2006) enthalten.
Die Lösung besteht darin, dass im Werkzeug, in der Werkzeugaufnahme, in der Werkstückspannvorrichtung oder in Komponenten davon ein oder mehrere Dehnkörper so angebracht sind, dass sie durch ihre Ausdehnung bei Erwärmung auf auxetische Verformungskörper so einwirken, dass diese ihre Abmessung in einer definierten Richtung, vorzugsweise senkrecht zur Druckbelastung verringern und dadurch die Wärmeausdehnung des gesamten Werkzeuges oder der Vorrichtung in dieser Richtung kompensiert oder zumindest verringert wird.
Der Dehnkörper besteht aus einem Werkstoff mit hohem thermischem Ausdehnungskoeffizienten. Der Dehnkörper kann auch hohl und mit einer Flüssigkeit gefüllt sein, um eine größere thermische Ausdehnung zu erreichen.

Das Wirkungsprinzip verdeutlicht Abbildung 1. Der sich mit zunehmender Temperatur ausdehnende Dehnkörper (1) wirkt in der zur zu kompensierenden Ausdehnung senkrechten x-Richtung auf den auxetischen Verformungskörper (2), so dass dieser in x-Richtung gestaucht wird, da die Verschiebung in x-Richtung durch feste Wände (4) behindert ist. Der auxetische Verformungskörper (2) zieht sich dadurch in y-Richtung zusammen. In der zu kompensierenden y-Richtung hat der Dehnkörper keinen Kontakt zu Vorrichtungs- oder Werkzeugteilen, sondern kann sich frei ausdehnen. Mit steigender Temperatur verkleinert sich damit der Abstand der Baugruppen (3).
Dehnkörper und Verformungskörper können in einer universell einsetzbaren Baugruppe zusammengefasst werden.

Die aus dem Zerspanungsprozess, aus Antrieben und aus der Umgebung in Werkzeug bzw. Vorrichtung eingeleitete Wärme kann nach dem Prinzip der *heat pipe* mittels gasförmiger, flüssiger oder fester Medien gezielt zum Dehnkörper geleitet werden. Die Erwärmung des Dehnkörpers wird durch die gezielte Wärmezuführung begünstigt, um so die Kompensationswirkung zu erhöhen. Das Wärmeleitsystem besteht aus festen Werkstoffen mit hoher Wärmeleitfähigkeit oder Leitungen, die mit flüssigen Medien mit hoher Wärmekapazität gefüllt sind und nach dem heat-pipe-Prinzip funktionieren. Das Wärmeleitsystem ist auf der einen Seite an die unmittelbare Umgebung der Schneide, zum Beispiel die Schneidplattenunterlage gekoppelt und am anderen Ende mit dem Dehnkörper verbunden. Um die Erwärmung des eigentlichen Werkzeugkörpers gering zu halten, können die Stellen der Wärmeeinleitung sowie das Wärmeleitsystem selbst vom übrigen Werkzeugkörper isoliert sein. Dazu werden Werkstoffe mit geringer Wärmeleitfähigkeit und ausreichender mechanischer Festigkeit verwendet.

Zur Verstärkung der negativen Ausdehnung des Gesamtsystems kann der Dehnkörper auch durch zusätzliche Fremdenergie, beispielsweise mittels integrierter elektrischer Heizelemente, definiert erwärmt werden.

Für die Verformungskörper werden strukturelle Eigenschaften sogenannter auxetischer Materialien oder durch geeignete Bearbeitung oder Herstellung erzielte auxetische Eigenschaften der inneren Struktur von Bauteilen ausgenutzt. Derartige Herstellungsverfahren sind generative Verfahren (rapid prototyping), wie zum Beispiel selektives Lasersintern und selektives Laserschmelzen, Stereolithografie, 3D-Druckverfahren, Feingussverfahren. Das Verhältnis von resultierender Verschiebung zur wirkenden Kraft wird durch Optimierung der inneren Struktur mittels numerischer Simulation, beispielsweise mit der Finiten-Elemente-Methode (FEM) an die zu kompensierenden thermo-mechanischen Verformungen angepasst.

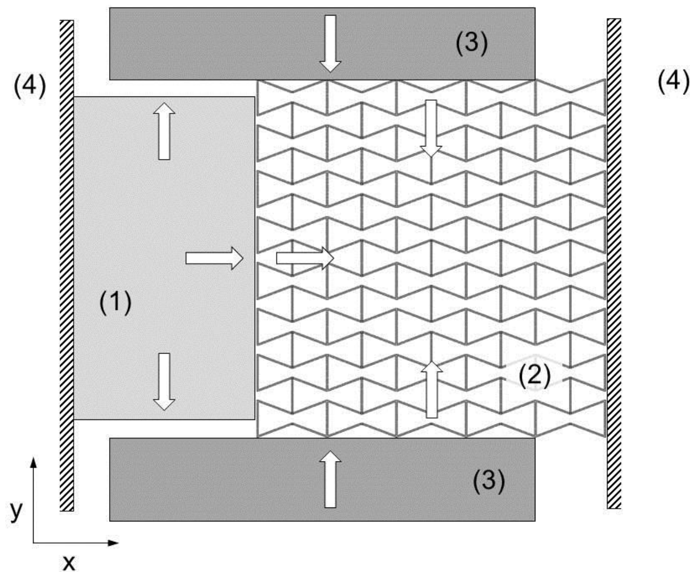


Abb. 1: Prinzipielle Wirkungsweise der Kompensation thermisch bedingter Dehnungen mittels auxetischer Strukturen (Im Beispiel Kompensation in y-Richtung)

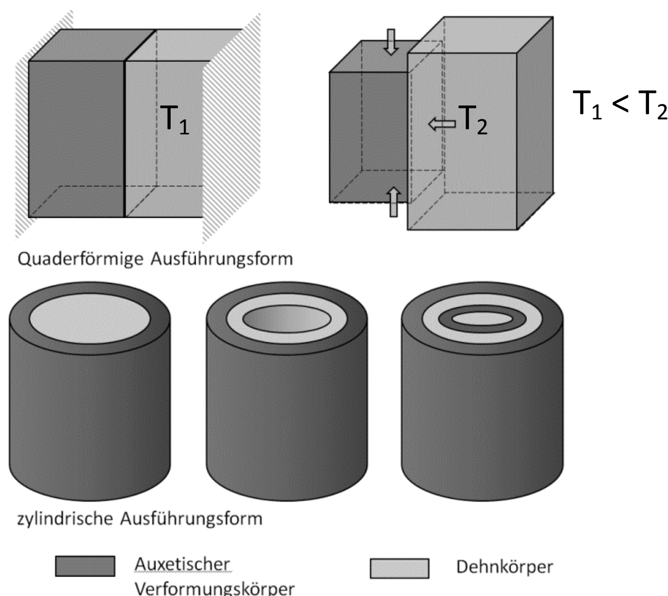


Abb. 2: Mögliche Ausführungsformen der Kompensationsbaugruppe

Dehnkörper und auxetische Verformungskörper können sowohl quaderförmig als auch zylindrisch geformt sein. Zylindrisch geformte Dehn- und Verformungskörper werden vorzugsweise als konzentrisch angeordnete Hohlzylinder verwendet, wobei die Länge der Verformungskörper bei Erwärmung kleiner wird. Dabei können jeweils ein oder mehrere Dehn- und Verformungskörper abwechselnd konzentrisch angeordnet sein (Abb. 2).

Die Struktur der auxetischen Verformungskörper ist so beschaffen, dass bei Stauchung in eine Richtung auch eine Zusammenziehen in mindestens eine dazu senkrechte Richtung erfolgt. Das kann zum Beispiel durch eine umgekehrte Wabenstruktur nach Abb. 1 erreicht werden, wobei die konkrete Ausführung in der Anzahl, der Dicke und dem Winkel der Stege oder der allgemeinen Form, wie beispielsweise scharfkantig oder wellenförmig gerundet abweichen kann. Ebenso können anstelle der Verformungskörper Elemente aus Polymeren mit auxetischen Eigenschaften eingesetzt werden.

Der Dehnkörper kann sich im Gegensatz zum auxetischen Verformungskörper in der zu kompensierenden Richtung frei dehnen, d. h. er stützt sich nicht gegen andere Bauteile ab.

Das Ausführungsbeispiel (Abb. 3) bezieht sich auf ein rotierendes spanendes Werkzeug, zum Beispiel ein Fräswerkzeug. Dabei kommt eine zylindrische Ausführungsform der Kompensationsbaugruppe zum Einsatz.
Die an der Werkzeugschneide und am bearbeiteten Bauteil freigesetzte Prozesswärme wird durch ein geeignetes inneres oder äußeres Wärmeleitsystem auf einen Dehnungskörper konzentriert, der sich bei Erwärmung ausdehnt. Der radiale Anteil der Ausdehnung führt zu einer radialen Druckbeanspruchung eines Verformungskörpers mit auxetischen Eigenschaften.
Die innere Struktur dieses Verformungskörpers ist so ausgelegt, dass bei Druckbeanspruchung in radialer Richtung ein Zusammenziehen in Längsrichtung des Werkzeuges erfolgt. Dadurch wird die positive Längenänderung der übrigen Komponenten des Werkzeuges bei Erwärmung ausgeglichen oder zumindest verringert.
Dehn- und Verformungskörper werden vorzugsweise als kompakte Einheit im Werkzeug angeordnet und sind durch ein Wärmeleitsystem mit den bevorzugten Stellen der Wärmeeinleitung verbunden.

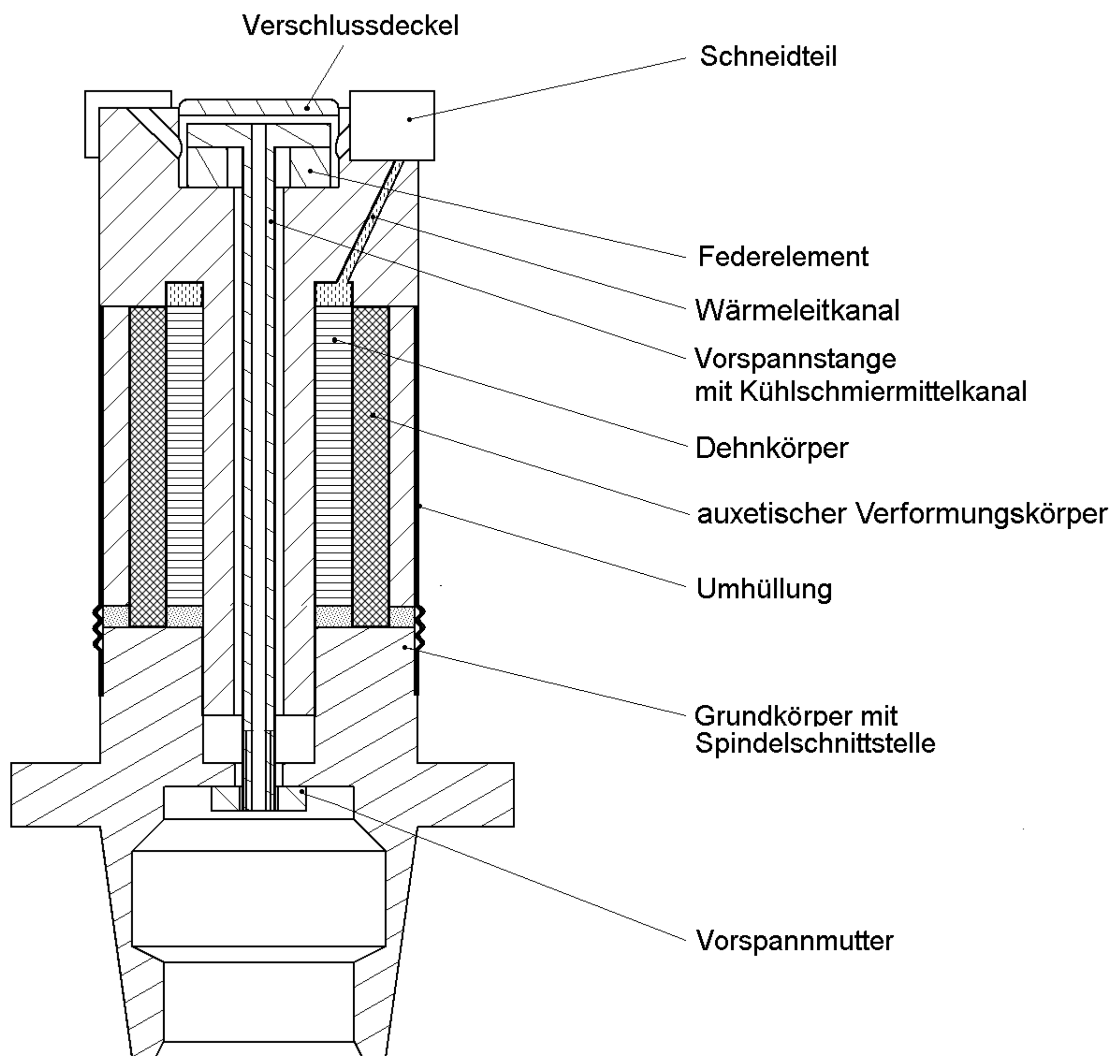


Abb. 3: Spanendes Werkzeug mit auxetischer Kompensation der thermischen Längenausdehnung

In ähnlicher Weise können kompakte Dehn- und Verformungskörpereinheiten an verschiedenen Stellen von Werkstückspannvorrichtungen angebracht werden.
Durch geeignete Materialauswahl und konstruktive Gestaltung kann die negative Dehnung in Abhängigkeit der Erwärmung eingestellt und so auf bestimmte Werkzeugsysteme bzw. Vorrichtungen und den Temperaturbereich abgestimmt werden.

Die beschriebene Lösung nutzt die Prozesswärme selbst und kommt so ohne von außen zugeführte Fremdenergie aus. Jedoch kann die Wirkung durch definierte zusätzliche Erwärmung des Dehnkörpers verstärkt werden.
Durch Größe, Struktur und Materialzusammensetzung des oder der Dehnkörper und des oder der Verformungskörper kann die Längenänderung des Werkzeuges oder der Vorrichtung in der definierten Wirkungsrichtung beeinflusst und an die gewünschte Kompensation angepasst werden.
Durch die gezielte Wärmeleitung zwischen den Stellen der Wärmeeinleitung und den Dehnungskörpern wird gleichzeitig die thermische Ausdehnung des Gesamtwerkzeuges bzw. der Vorrichtung verringert.

Die beschriebene Lösung verfolgt das Ziel der Kompensation thermischer Verformungen an spanenden Werkzeugen, Werkzeugaufnahmen und Werkstückspannvorrichtungen. Der Einsatz ist aber auch überall dort möglich, wo in technischen Gebilden thermisch bedingte Dehnungen verringert bzw. kompensiert werden sollen.

Literatur:

Burke, M. 1997. A stretch of imagination. *New Scientist Magazine.* 1997, Bd. 154, 2085.

Liu, Q. 2006. *Literature Review: Materials with negative Poisson's ratios an potential applications to aerospace and defence.* Victoria, Australia : DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2006.

Mitschke, H., et al. 2011. Finding Auxetic Frameworks in Periodic Tessellations. *Advanced Materials.* 2011, Bde. 22-23.

Obrecht, H. und Reinicke, U. 2011. *Konstruktion und Entwicklung.* 2011, 5.

Pour, N., et al. 2006. *Angewandte Chemie.* 2006, Bd. 118.

Schwerdtfeger, J., et al. 2011. Design of Auxetic Structures via Mathematical Optimization. *Advanced Materials.* 2011, Bde. 22-23.

Patente:

Patentierte Anwendungen auxetischer Strukturen zielen auf die Kompensation von Verformungen, die Dämpfung von Schwingungen und die Verbesserung der Festigkeit bzw. Widerstandsfähigkeit gegenüber Verformungen.

US 7.824.763 B2, 2. Nov. 2010:

Kompositmaterial aus zwei Materialien mit jeweils positiven bzw. negativen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (auxetische Materialien, keine künstlich erzeugten Strukturen)Ziel: Kompensation der Verlagerung zwischen Rotor und Stator von Turbinen durch thermische Ausdehnung und damit kleinerer möglicher Abstand zwischen Schaufeln und Gehäuse (→ höherer Wirkungsgrad)

US 7.837.147 B2, 23. Nov. 2010:

Komposit aus auxetischem Kern, Dämpfungsschicht und starrer (constraining) Außenlage zur Schwingungs- und Geräuschdämpfung am Flugzeugrumpf

WO2004/104315 A1, 2. Dez. 2004:

Verbesserung der Lasttragfähigkeit beliebiger Bauelemente durch Oberflächen mit auxetischen Eigenschaften

DE 60 2005 004 701 T2, 19. Febr. 2009:

Energieaufnehmende Gegenstände durch auxetische Strukturen mit Zellbegrenzungen, d. h. Verformungsverhinderung senkrecht zur Belastungsrichtung, wodurch die Verformung in Belastungsrichtung reduziert wird.

Daneben existiert eine Reihe von Patenten zur Erzeugung von Fasern, Geweben und Faserverbunden mit auxetischen Eigenschaften:

US 2008/0011021 A1, 17. Jan. 2008

WO/2008/016690, 07. Febr. 2008

US 2007/0031667 A1, 8. Febr. 2007

US 6.878.320 B1, 12. Apr. 2005

und Polymeren mit auxetischen molekularen Strukturen:

DE60021177T2, 27.04.2006